

**การประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็กหม้อแปลง  
ที่ขนาดความหนาเบอร์ M4 เทียบกับเบอร์ M5 เมื่อแหล่งจ่ายแรงดัน  
เป็นสัญญาณชายน้และไม่เป็นสัญญาณชายน้**

สิริวิษ ทัดสวน<sup>1</sup>, ธีรวัฒน์ พ้ชตรตระกูล<sup>1</sup>, รัชชัย ธรรมประสิทธิ์<sup>1</sup>

วิทยาลัยเทคโนโลยีธนะบุรี กรุงเทพฯ 10160

บุญเลิศ สือเฉย<sup>1</sup>

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพฯ 10160

ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล<sup>2</sup>

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

รับเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2545 ตอบรับเมื่อ 24 กันยายน 2546

### **บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นงานวิจัย การประมาณค่าสูญเสียของแกนเหล็กหม้อแปลง 1 เฟส เพื่อศึกษาถึงค่าความสูญเสียของแกนเหล็กเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันเป็นสัญญาณชายน้และไม่เป็นสัญญาณชายน้ของแกนเหล็กแบบเรียงแนวรีดเบอร์ M4 และเบอร์ M5 ขั้นตอนการทดสอบได้ใช้แกนเหล็กแบบเรียงแนวรีดเบอร์ M4 และ M5 ร่วมกับชุดทดสอบ Epstein จากนั้นใช้แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสให้กับชุดทดสอบ Epstein ค่ากำลังไฟฟ้าจริง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและอื่นๆ ที่วัดได้ถูกวัดด้วยเพาเวอร์มิเตอร์ยี่ห้อ Fluke 41B และบันทึกภาพสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ด้วยออสซิลโลสโคปยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL1520 ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ทราบถึงค่าที่แตกต่างของความสูญเสียแกนเหล็กทั้งสองขนาด เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันมีสัญญาณเป็นชายน้และไม่เป็นชายน้ ทำให้สามารถเลือกออกแบบใช้แกนเหล็กหม้อแปลงได้อย่างเหมาะสมกับสภาพของแหล่งจ่ายที่มีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นชายน้ รวมถึงได้พิจารณา ด้านเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

<sup>1</sup> อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>2</sup> อาจารย์ ภาควิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

## **Estimation of Core Loss of M4 and M5 Transformer Core Material under Sinusoidal and Non-Sinusoidal Voltage Excitation**

**Siriwich Tadsuan<sup>1</sup>, Teerawat Patcharatakul<sup>1</sup>, Thawatchai Dhammaprasit<sup>1</sup>**

Thonburi College of Technology, Bangkok 10160

**Boonlert Suechoey<sup>1</sup>**

South-East Asia University, Bangkok 10160

**Chanwit Tangsiriworakul<sup>2</sup>**

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

*Received 22 November 2002 ; accepted 24 September 2003*

### **Abstract**

This paper presents an estimation of core loss in a single-phase transformer in order to study the core losses of M4 and M5 grain oriented magnetic steel size when the input voltage waveforms are sinusoidal and non-sinusoidal. The steel and Epstein test apparatus are energized by a single-phase inverter. The real current, voltage, power and other parameters are measured by a Fluke 41B power quality meter and a Yokogawa DL 1520 oscilloscope. The results show the difference of core losses of both steels, under different waveforms. The steel selection is determined by the waveform qualities and the economic reasons.

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Electrical Engineering.

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Electrical, College of Industrial Technology.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ เช่น หม้อแปลง, มอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอื่นๆ อาจไม่เป็นสัญญาณไซน์ ซึ่งแหล่งจ่ายเหล่านี้มีสัญญาณฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ด้วย ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงเพื่อรองรับกับแหล่งจ่ายที่ไม่เป็นสัญญาณไซน์จะต้องคำนึงถึงค่าสูญเสียที่แกนเหล็กและราคาของแผ่นเหล็ก แผ่นเหล็กที่มีความบางจะมีค่าความสูญเสียต่ำกว่าแผ่นเหล็กที่หนาแต่ราคาก็จะสูงกว่า ดังนั้นการออกแบบที่ดังนั้นจะต้องคำนึงความเหมาะสมในด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ประกอบกันด้วย

## 2. ทฤษฎี

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แผ่นเหล็กของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างคลื่นของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ซึ่งค่า B ขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันไฟฟ้า โดยที่ละทิ้งค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์รั่ว ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แผ่นเหล็กประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ

### 2.1 การสูญเสียจากฮีสเทอรีซิส

จาก [1] เมื่อคลื่นของแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะได้

$$V_{(ot)} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \sqrt{2} V_{n(rms)} \sin (n\omega t + \phi_n) \quad (1)$$

$V_{(ot)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ, V

$V_{n(rms)}$  คือ ค่าแรงดันประสิทธิผลที่ค่าลำดับฮาร์มอนิกส์ใดๆ, V

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม radian/sec

n คือ ลำดับฮาร์มอนิกส์

t คือ เวลา, วินาที

$\phi_n$  คือ มุมเฟสของฮาร์มอนิกส์ที่ n

สำหรับขนาดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะได้

$$B_{(max)} = \frac{\pi}{2.N.A.\omega} \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{(ot)} d(\omega t) = \frac{\pi}{2.N.A.\omega} \cdot V_{(ave)} = \frac{1}{N.A.\omega} \cdot V_{(max)} \quad (2)$$

$B_{(max)}$  คือ ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก, Weber/m<sup>2</sup>

$V_{(ave)}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย, V

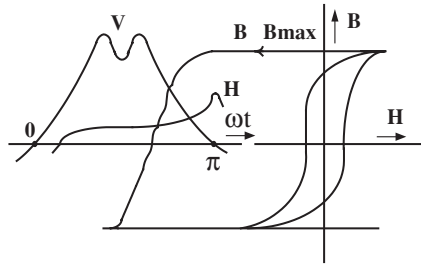
$V_{(max)}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด, V

N คือ จำนวนรอบของตัวนำ, turn

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก,  $m^2$   
โดยที่

$$V_{(ave)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sum \frac{V_{n(rms)}}{n} \cos \phi_n \quad (3)$$

สำหรับคลื่นแรงดันที่ตัดผ่านเส้นแรงดันศูนย์มีครั้งเดียวของทุกๆ ไซเคิลดังรูปที่ 1 ความชันของคลื่น B จะไม่เปลี่ยนเครื่องหมาย ซึ่งแสดงได้ในช่วงระหว่  $0 < \omega t < \pi$  การคำนวณจะใช้ Steinmetz's formula ดังสมการที่ 4



รูปที่ 1 ฮีสเทอรีซิสลูป ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันไม่เป็นไซน์, ค่า B และค่า H

$$P_H = k_H \cdot f \cdot B_{(max)}^\sigma = k_H \cdot f \cdot \left( \frac{\pi}{2NA \omega} \cdot V_{(ave)} \right)^\sigma \quad (4)$$

เมื่อ

$P_H$  คือค่าสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซิส, W

$k_H$  คือค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดลอง

$\sigma$  คือค่า Steinmetz's มีค่าระหว่าง 1.0 -3.0 โดยทั่วไปกำหนด = 1.6

เมื่อ

$$K_H = k_H \left( \frac{\pi}{2NA \omega} \right)^\sigma \quad (5)$$

จะได้

$$P_H = K_H \cdot f \cdot (V_{(ave)})^\sigma \quad (6)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันประสิทธิผลที่แผ่นป้ายที่คลื่นมูลฐาน โดยแทนสมการที่ 3 ลงในสมการที่ 6 และแทนค่า  $\phi_n = 0^\circ$  จะได้ ค่าสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิสตั้งสมการที่ 7

$$P_{HN} = K_H \cdot f \cdot \left( \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{(rms)}}{\pi} \right)^\sigma \quad (7)$$

$P_{HN}$  คือ ค่าสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิสที่แรงดันแผ่นป้ายชื่อที่คลื่นมูลฐาน, W

$V_{(rms)}$  คือ ค่าแรงดันประสิทธิผลที่แรงดันที่แผ่นป้ายชื่อ, V

ดังนั้น สามารถหาค่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็ก เมื่อพิจารณาแรงดันฮาร์โมนิกส์ร่วมด้วย ดังสมการที่ 8-10

$$P_H = K_H \cdot f \cdot \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{n(rms)}}{n} \cos \phi_n \right)^\sigma \quad (8)$$

$$P_H = \left( K_H \cdot f \cdot \left[ \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{(rms)}}{\pi} \right] \right)^\sigma \left( \frac{1}{V_{(rms)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{n(rms)}}{n} \cos \phi_n \right)^\sigma \quad (9)$$

$$P_H = P_{HN} \cdot \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \frac{V_{n(rms)}}{V_{(rms)}} \cos \phi_n \right)^\sigma \quad (10)$$

## 2.2 การสูญเสียจากกระแสไหลวน

จาก [1] ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนของแผ่นเหล็กบางเมื่อเกิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์ร่วมด้วยดังสมการที่ 11

$$P_{ecn} = K_e \cdot n^2 \cdot f^2 \cdot B_{n(max)}^2 \cdot C_{en} \quad (11)$$

$P_{ecn}$  คือ ค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ใดๆ, W

$B_{n(max)}$  คือ ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ใดๆ, Weber/m<sup>2</sup>

$K_e$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะและความหนาของแผ่นเหล็ก

$C_{en}$  คือ ค่าฟังก์ชันที่ปรับค่า

เมื่อ

$$C_{en} = 1 - 0.0017\xi^{3.61}, \xi < 3.6 \quad (12)$$

$$C_{en} = \frac{3}{\xi}, \xi > 3.6 \quad (13)$$

โดยที่

$$\xi = \Delta \sqrt{\pi \cdot \mu \cdot \gamma \cdot n \cdot f} \quad (14)$$

เมื่อ

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (15)$$

$\pi$  คือ ค่าคงที่ มีค่า 3.141592654

$\Delta$  คือ ค่าความหนาของแผ่นเหล็ก, m

$\mu$  คือ ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก H/m

$\gamma$  คือ ค่าความนำจำเพาะของแกนเหล็ก, mho/m

$\rho$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของแกนเหล็ก,  $\Omega$ -m

ที่ความถี่คลื่นมูลฐาน ( $n = 1$ )  $n \cdot f = 50$  Hz ที่เบอร์ M5 ค่า  $C_{en} = C_{e1} 0.99794 \approx 1$  และที่เบอร์ M4 ค่า  $C_{en} = C_{e1} = 0.9980 \approx 1$  (จากงานวิจัยนี้ ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 1 และที่ 2 ตามลำดับ) ดังนั้น จากสมการที่ 11 ถ้าพิจารณาเฉพาะคลื่นมูลฐานเพื่อหาค่า  $P_{ecN}$  จะได้สมการที่ 16

$$P_{ecN} = K_e \cdot f^2 \cdot B_{(max)}^2 \quad (16)$$

$C_{e1}$  คือ ค่าฟังก์ชันที่ปรับค่า ที่คลื่นมูลฐาน ( $n = 1$ )

$P_{ecN}$  คือ ค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสเอ็ดดี้ที่แรงดันที่แผ่นป้ายชื่อ, W

เมื่อ

$$B_{n(max)} = \frac{\Phi_{n(max)}}{A} = \frac{V_{n(max)}}{\omega \cdot n \cdot A \cdot N} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{n(rms)}}{\omega \cdot n \cdot A \cdot N} \quad (17)$$

ดังนั้น สามารถปรับสมการที่ 11 เป็นสมการที่ 18 ได้คือ

$$P_{ecn} = K_e \cdot n^2 \cdot f^2 \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot V_{n(rms)}}{\omega \cdot n \cdot A \cdot N} \right)^2 \cdot C_{en} \quad (18)$$

และ

$$P_{ecn} = K_e \cdot \frac{n^2}{n^2} \cdot f^2 \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot V_{n(rms)} \cdot B_{(max)}}{\omega \cdot n \cdot A \cdot N_{(max)}} \right)^2 \cdot C_{en} \quad (19)$$

จากความสัมพันธ์

$$V_{(max)} = \omega \cdot A \cdot N \cdot B_{(max)}$$

ดังนั้น

$$P_{ecn} = K_e \cdot B_{(max)}^2 \cdot f^2 \cdot \left( \frac{V_{n(max)}}{V_{(max)}} \right)^2 \cdot C_{en} \quad (20)$$

$$P_{ec} = \sum_{n=1}^{n=\infty} P_{ecn} = \sum_{n=1}^{n=\infty} K_e \cdot B_{(max)}^2 \cdot f^2 \cdot \left( \frac{V_{n(max)}}{V_{(max)}} \right)^2 \cdot C_{en} \quad (21)$$

$$P_{ec} = K_e \cdot B_{(max)}^2 \cdot f^2 \cdot \left( \frac{V_{1(max)}}{V_{(max)}} \right)^2 \cdot C_{e1} + \sum_{n \neq 1}^{n=\infty} K_e \cdot B_{(max)}^2 \cdot f^2 \cdot \left( \frac{V_{n(max)}}{V_{(max)}} \right)^2 \cdot C_{en} \quad (22)$$

เมื่อ  $n = 1$  จะได้  $C_{e1} \approx 1$  (จากการทดสอบในงานวิจัยนี้)

ดังนั้น

$$P_{ec} = K_e \cdot B_{(max)}^2 \cdot f^2 \cdot \left( \frac{V_{1(max)}}{V_{(max)}} \right)^2 \left[ 1 + \left( \frac{V_{(max)}}{V_{1(max)}} \right)^2 \sum_{n \neq 1}^{n=\infty} \left( \frac{V_{n(max)}}{V_{(max)}} \right)^2 \cdot C_{en} \right] \quad (23)$$

$$P_{ec} = P_{ecN} \left( \frac{V_{1(max)}}{V_{(max)}} \right)^2 \left[ 1 + \sum_{n \neq 1}^{n=\infty} \left( \frac{V_{n(max)}}{V_{1(max)}} \right)^2 \cdot C_{en} \right] \quad (24)$$

หรือ

$$P_{ec} = P_{ecN} \left( \frac{V_{1(rms)}}{V_{(rms)}} \right)^2 \left[ 1 + \sum_{n \neq 1}^{n=\infty} \left( \frac{V_{n(rms)}}{V_{1(rms)}} \right)^2 \cdot C_{en} \right] \quad (25)$$

ดังนั้น

$$P_{core} = P_{ec} + P_H \quad (26)$$

$P_{core}$  คือ ค่าสูญเสียของแกนเหล็ก โดยพิจารณาค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิกส์ร่วมด้วย,  $W$

### 3. ขั้นตอนการทดสอบ

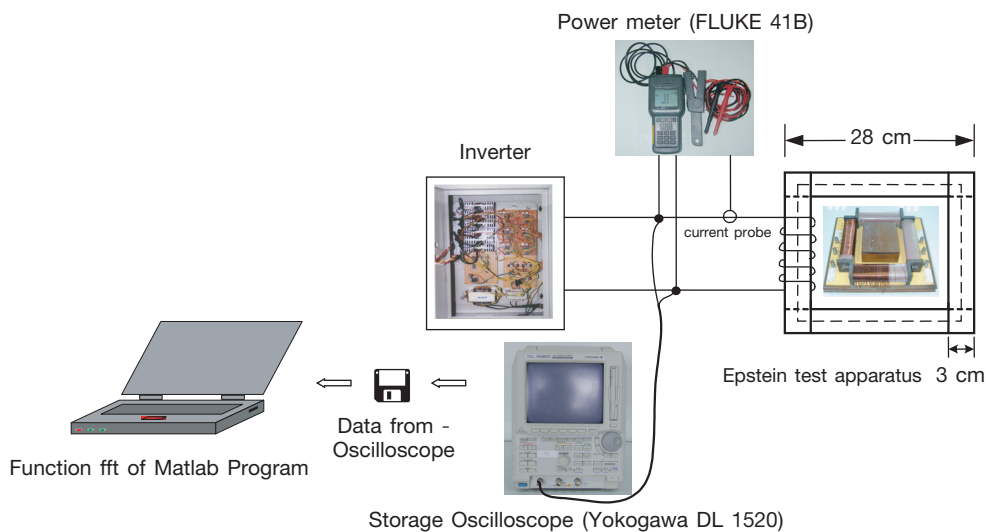
การทดสอบได้ใช้ชุดทดสอบ Epstein และใช้แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของแกนเหล็กเบอร์ M5 แสดงดังรูปที่ 3-12 ส่วนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของแกนเหล็กเบอร์ M4 แสดงดังรูปที่ 13-18

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของแกนเหล็กเบอร์ M5 และขดลวดเมื่อทำการออกแบบ

$V_{\text{rms(sin)}}$ ที่แผ่นป้ายชื่อ = 4.5 V	$B_{\text{max}} = 1.482$ Tesla ที่ $V_{\text{rms(sin)}} = 4.5$ V	กำลังสูญเสียแกนเหล็กจากการทดสอบที่ $V_{\text{rms}} \sin 50$ Hz = 1.67 w	
$i_{\text{rms}} = 0.4$ A ที่ $V_{\text{rms(sin)}} = 4.5$ V	$H_{\text{max}} = 40$ A.t/m ที่ $V_{\text{rms(sin)}} = 4.5$ V	กำลังสูญเสียแกนเหล็กจากการทดสอบที่ $V_{\text{rms}} \sin 35$ Hz = 0.99 w	
Wide <sub>core</sub> = 3 cm	$\mu = 0.0370$ H/m ที่ $V_{\text{rms(sin)}} = 4.5$ V	$P_{\text{HN}} = 0.818$ w	$P_{\text{ecN}} = 0.852$ w
Long <sub>core</sub> = 28 cm	$\Delta = 0.3$ mm (M5)	จำนวนแผ่นเหล็ก = 128 แผ่น	
Coil = 50 turn	$\rho = 47 \mu\Omega - \text{c.m.}$ [3]	น้ำหนักแกนเหล็กทั้งหมด = 2.3936 kg	

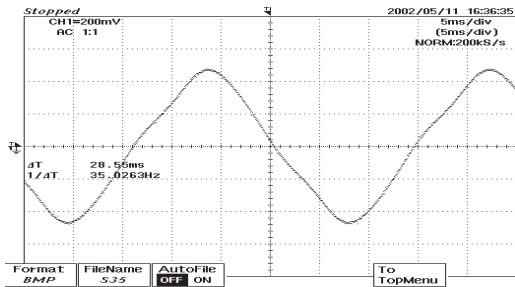
ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของแกนเหล็กเบอร์ M4 และขดลวดเมื่อทำการออกแบบ

$V_{\text{rms(sin)}}$ ที่แผ่นป้ายชื่อ = 4.5 V	$B_{\text{max}} = 1.5$ Tesla ที่ $V_{\text{rms(sin)}} = 4.5$ V	กำลังสูญเสียแกนเหล็กจากการทดสอบที่ $V_{\text{rms}} \sin 50$ Hz = 1.52 w	
$i_{\text{rms}} = 0.458$ A ที่ $V_{\text{rms(sin)}} = 4.5$ V	$H_{\text{max}} = 40$ A.t/m ที่ $V_{\text{rms(sin)}} = 4.5$ V	กำลังสูญเสียแกนเหล็กจากการทดสอบที่ $V_{\text{rms}} \sin 35$ Hz = 0.87 w	
Wide <sub>core</sub> = 3 cm	$\mu = 0.0375$ H/m ที่ $V_{\text{rms(sin)}} = 4.5$ V	$P_{\text{HN}} = 0.733$ w	$P_{\text{ecN}} = 0.667$ w
Long <sub>core</sub> = 28 cm	$\Delta = 0.27$ mm (M4)	จำนวนแผ่นเหล็ก = 140 แผ่น	
Coil = 50 turn	$\rho = 47 \mu\Omega - \text{c.m.}$ [3]	น้ำหนักแกนเหล็กทั้งหมด = 2.3422 kg	

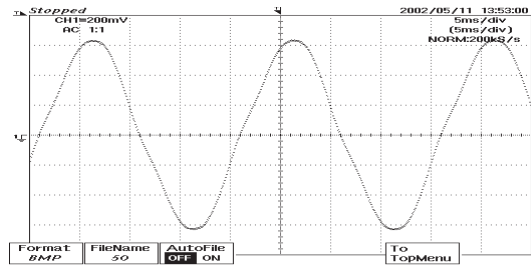


รูปที่ 2 ชุดทดสอบ Epstein และแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์

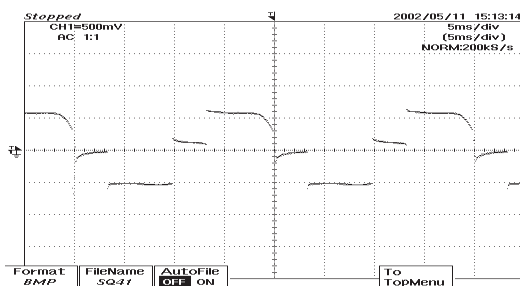




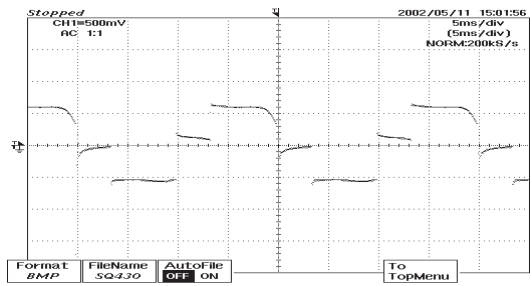
รูปที่ 3 รูปแรงดันสัญญาณไซน์ 35 Hz,  $V_{rms} = 3.15$  V สร้างโดยใช้ซิงโครนิส เจนเนอเรเตอร์ และผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน เหล็ก M5



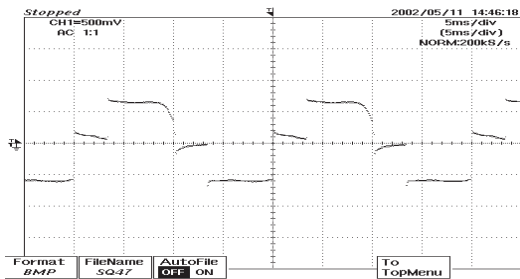
รูปที่ 4 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณไซน์ 50 Hz ที่แรงดัน  $V_{rms} = 4.5$  V เหล็ก M5



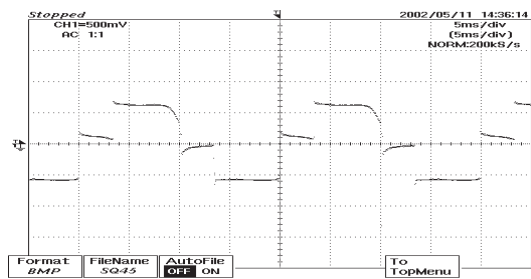
รูปที่ 5 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz โดยการปรับค่า  $V_{l(rms)} = 4.1$  V,  $\%THD_v = 55.1$  % เหล็ก M5



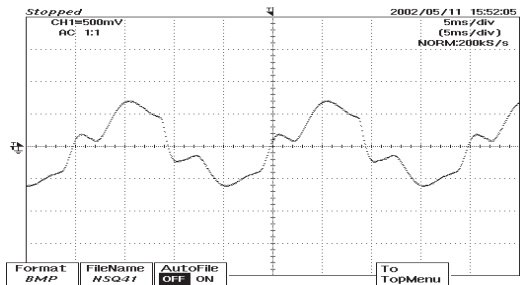
รูปที่ 6 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz โดยการปรับค่า  $V_{l(rms)} = 4.3$  V,  $\%THD_v = 55.3$  % เหล็ก M5



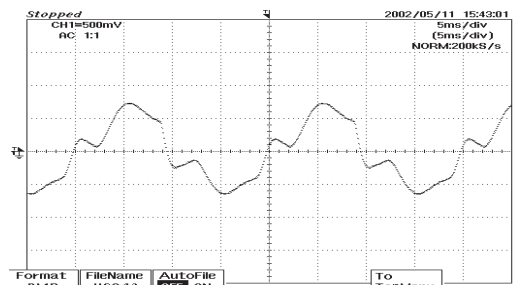
รูปที่ 7 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz โดยการปรับค่า  $V_{l(rms)} = 4.5$  V,  $\%THD_v = 53.2$  % เหล็ก M5



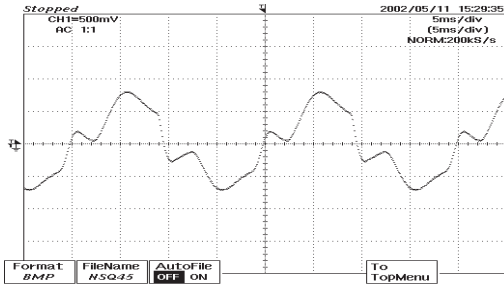
รูปที่ 8 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz โดยการปรับค่า  $V_{l(rms)} = 4.7$  V,  $\%THD_v = 52.8$  % เหล็ก M5



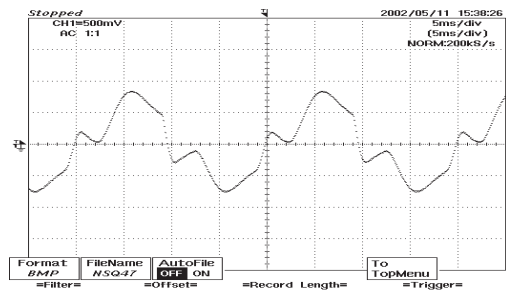
รูปที่ 9 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz และผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยการปรับค่า  $V_{l(rms)} = 4.1$  V,  $\%THD_v = 29.8$  % เหล็ก M5



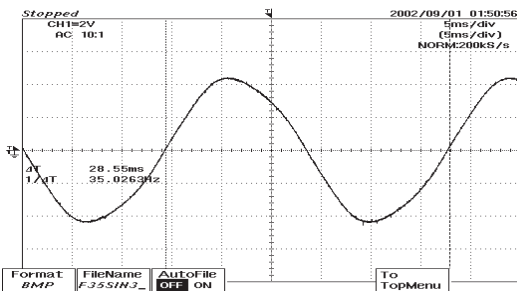
รูปที่ 10 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz และผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยการปรับค่า  $V_{l(rms)} = 4.3$  V,  $\%THD_v = 30.5$  % เหล็ก M5



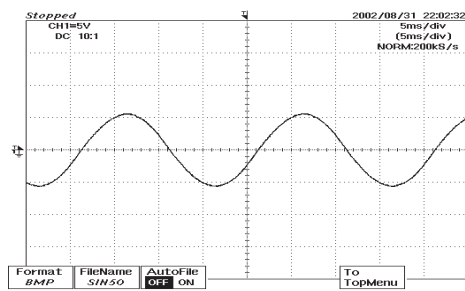
รูปที่ 11 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz และผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยการปรับค่า  $V_{I(mms)} = 4.5$  V, %THD<sub>v</sub> = 32.8% เหล็ก M5



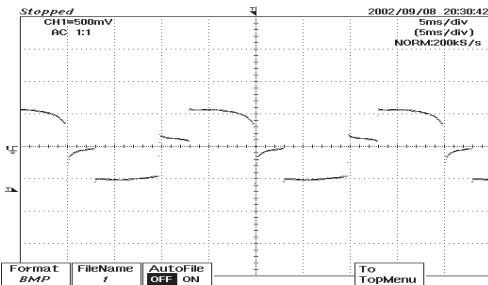
รูปที่ 12 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz และผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยการปรับค่า  $V_{I(mms)} = 4.7$  V, %THD<sub>v</sub> = 34.7% เหล็ก M5



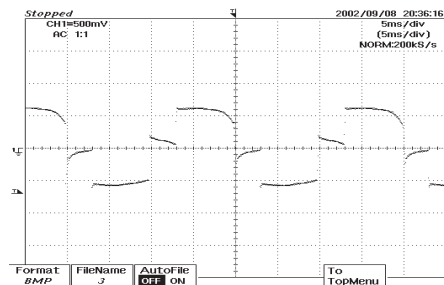
รูปที่ 13 รูปแรงดันสัญญาณชายนี 35 Hz,  $V_{ms} = 3.15$  V สร้างโดยใช้ซิงโครไนส์เจเนอเรเตอร์ และผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านแกนเหล็ก M4



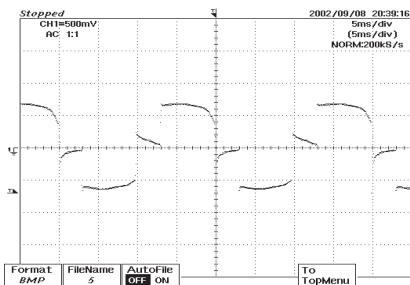
รูปที่ 14 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณชายนี 50 Hz ที่แรงดัน  $V_{ms} = 4.5$  V เหล็ก M4



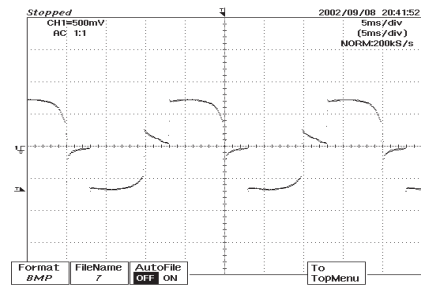
รูปที่ 15 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz โดยการปรับค่า  $V_{I(mms)} = 4.1$  V, %THD<sub>v</sub> = 48.9% เหล็ก M4



รูปที่ 16 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz โดยการปรับค่า  $V_{I(mms)} = 4.3$  V, %THD<sub>v</sub> = 50.4% เหล็ก M4



รูปที่ 17 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz โดยการปรับค่า  $V_{I(mms)} = 4.5$  V, %THD<sub>v</sub> = 49.3% เหล็ก M4

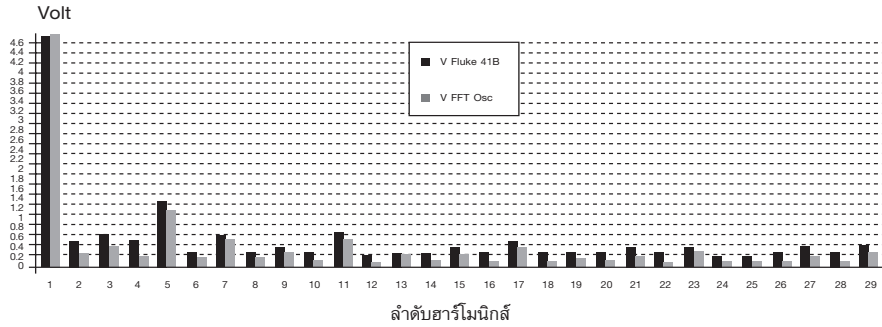


รูปที่ 18 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณ Quasi Square 50 Hz โดยการปรับค่า  $V_{I(mms)} = 4.5$  V, %THD<sub>v</sub> = 50.0% เหล็ก M4

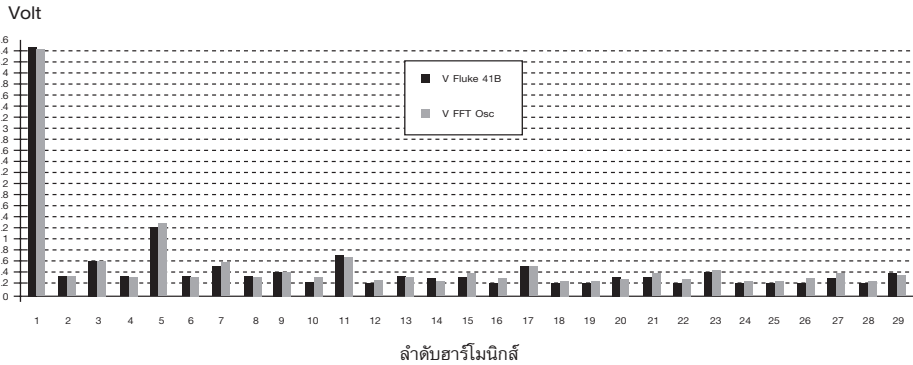
ตารางที่ 3 การคำนวณหาขนาด (Mag) / มุม (Degree) ของ  $V_{n(rms)}$  จากรูปที่ 5 -8 และรูปที่ 15-18 จากฟังก์ชัน FFT

order	รูปที่ 5	รูปที่ 6	รูปที่ 7	รูปที่ 8	รูปที่ 15	รูปที่ 16	รูปที่ 17	รูปที่ 18
1	4.1636 /-21.65°	4.3148 /-22.50°	4.5218 /-22.61°	4.6890 /-23.00°	4.0706 /-19.02°	4.1477 /-19.99°	4.4654 /-20.89°	4.5884 /-20.90°
2	0.2949 /-69.38°	0.3123 /-69.53°	0.2609 /-68.83°	0.2529 /-72.79°	0.2030 /-78.4°	0.31 /-76.17°	0.2974 /-75.94°	0.3128 /-78.46°
3	0.4217 /56.64°	0.4538 /57.69°	0.4484 /60.39°	0.4441 /60.40°	0.2820 /48.60°	0.5917 /65.99°	0.5978 /66.726°	0.6388 /68.68°
4	0.2251 /-79.38°	0.2418 /-83.20°	0.2238 /-84.23°	0.2122 /-84.58°	0.1658 /-87.54°	0.3162 /-82.57°	0.2940 /-84.42°	0.3190 /-84.43°
5	1.0415 /38.12°	1.0869 /36.05°	1.1412 /36.22°	1.1867 /36.67°	0.8915 /40.05°	1.1482 /40.25°	1.2444 /38.10°	1.2861 /39.96°
6	0.1671 /-70.17°	0.1758 /-71.04°	0.1771 /-70.80°	0.1786 /-69.21°	0.1334 /264.68°	0.2742 /-83.62°	0.2819 /-82.75°	0.2933 /-80.96°
7	0.5065 /-9.00°	0.5049 /-12.18°	0.5437 /-12.08°	0.5758 /-13.31°	0.6450 /-4.45°	0.5041 /2.56°	0.5706 /-1.66°	0.5752 /-0.11°
8	0.1712 /-73.59°	0.2074 /-72.42°	0.1905 /-73.33°	0.1949 /-74.60°	0.1178 /250.07°	0.2847 /-81.52°	0.2985 /-89.53°	0.3267 /-88.49°
9	0.2533 /77.84°	0.2833 /78.54°	0.2923 /79.89°	0.2801 /80.23°	0.1302 /11.64°	0.4110 /78.50°	0.4034 /76.49°	0.4590 /80.16°
10	0.1396 /-82.07°	0.1549 /-85.90°	0.1449 /-85.34°	0.1427 /268.8°	0.0959 /244.38°	0.2446 /-88.63°	0.2795 /262.74°	0.2874 /266.65°
11	0.5178 /39.94°	0.5288 /36.02°	0.5566 /38.17°	0.5761 /39.45°	0.4173 /44.37°	0.6181 /45.34°	0.6617 /42.23°	0.6915 /44.21°
12	0.1121 /-75.18°	0.1200 /-71.04°	0.1183 /-68.36°	0.1213 /-68.00°	0.0981 /243.98°	0.2367 /-85.39°	0.2388 /266.79°	0.2704 /-87.69°
13	0.2549 /-0.63°	0.2323 /-5.09°	0.2626 /-3.417°	0.2851 /-4.67°	0.4245 /3.06°	0.2637 /25.98°	0.3073 /13.51°	0.3085 /19.89°
<i>Pec</i>	0.808	0.887	0.967	1.174	0.884	1.017	1.120	1.224
<i>P<sub>H</sub></i>	0.780	0.822	0.878	0.921	0.540	0.576	0.641	0.666
<b>Pc_c</b>	<b>1.588</b>	<b>1.709</b>	<b>1.845</b>	<b>2.095</b>	<b>1.424</b>	<b>1.593</b>	<b>1.761</b>	<b>1.89</b>
<b>Pc_t</b>	<b>1.6</b>	<b>1.7</b>	<b>1.9</b>	<b>2</b>	<b>1.5</b>	<b>1.7</b>	<b>1.8</b>	<b>2</b>
<i>Abe</i>	-0.012	-0.009	-0.055	0.095	-0.076	-0.107	-0.039	-0.110
%Re	-0.75	0.529	-2.895	4.75	-5.067	-6.294	-2.167	-5.5

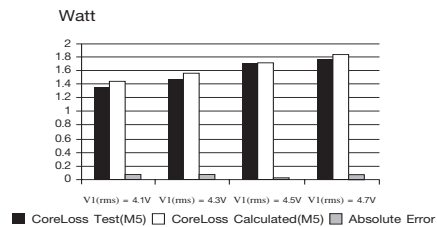
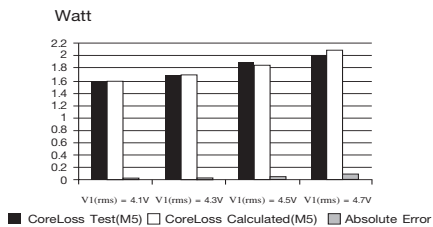
ผลการทดสอบโดยใช้เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ Fluke 41B เปรียบเทียบกับการคำนวณ โดยใช้ Storage Oscilloscope ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL1520 จับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า จากนั้นใช้ฟังก์ชัน FFT ของโปรแกรม Matlab หาขนาดและมุมเฟสของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1-29 ของแรงดันที่วัดได้จาก Oscilloscope (รูปที่ 3-18) ค่าต่างๆ ที่ได้จากการวัดและการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบ  $V_{(rms)}$  ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ของแกนเหล็กเบอร์ M5 เมื่อตั้งค่า  $V_{1(rms)}$  จาก Fluke 41B เท่ากับ 4.5 Volts (รูปที่ 6) เที่ยบกับการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจาก Storage Oscilloscope ร่วมกับฟังก์ชัน FFT

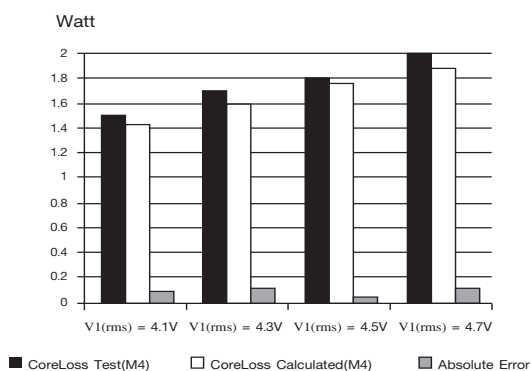


รูปที่ 20 การเปรียบเทียบ  $V_{(rms)}$  ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ของแกนเหล็กเบอร์ M4 เมื่อตั้งค่า  $V_{1(rms)}$  จาก Fluke 41B เท่ากับ 4.5 Volts เที่ยบกับการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจาก Storage Oscilloscope ร่วมกับฟังก์ชัน FFT

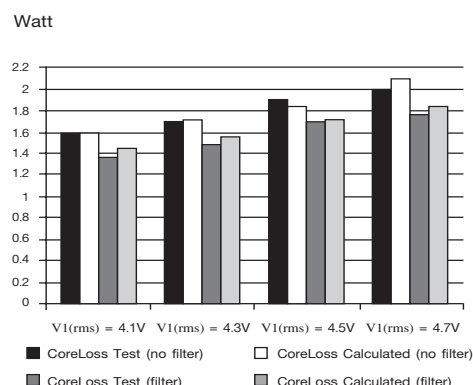


รูปที่ 21 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียเหล็กเบอร์ M5 จากค่าที่วัดได้เทียบกับการคำนวณ จากแหล่งจ่าย รูปที่ 5-8

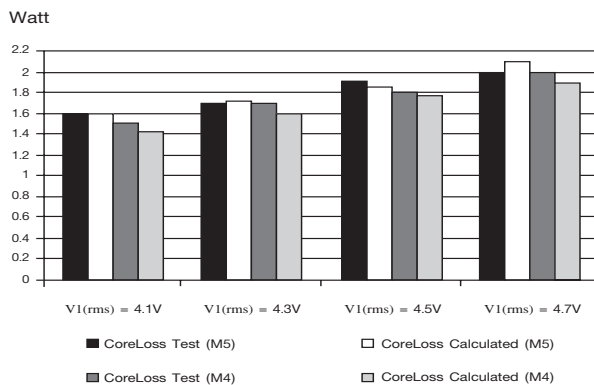
รูปที่ 22 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียเหล็กเบอร์ M5 จากค่าที่วัดได้เทียบกับการคำนวณ จากแหล่งจ่ายรูปที่ 9-12



รูปที่ 23 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียเหล็ก M4 จากค่าวัดได้เทียบกับคำนวณจากแหล่งจ่ายรูปที่ 15-18



รูปที่ 24 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียเหล็ก M5 จากค่าที่วัดได้กับค่าจากรูปที่ 5-12



รูปที่ 25 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสีย จากค่าที่วัดได้เทียบกับค่าจากการคำนวณ จากรูปที่ 5-8 และ 15-18

**หมายเหตุ**

Pc\_t = Core loss by Test (จาก Fluke 41B), Pc\_c = Calculated Core loss  
 Abe(Absolute error) = Pc\_c - Pc\_t , % Re (Relative error) =  $\frac{Pc_c - Pc_t}{Pc_t} \times 100$

**4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ**

4.1 จากรูปที่ 5-8 และรูปที่ 15-18 เป็นผลการทดสอบของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กเบอร์ M5 และ M4 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าที่ V<sub>(rms)</sub> มีรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสัญญาณใกล้เคียงกัน ผลลัพธ์ค่าจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 26 ซึ่งได้จากสมการที่ 10 บวกสมการที่ 25) สามารถนำไปใช้กับแกนเหล็กที่มีความหนาเบอร์ต่างๆ ได้

4.2 จากรูปที่ 5-8 และรูปที่ 9-12 เป็นผลการทดสอบของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กเบอร์ M5 ซึ่งเห็นได้ว่าที่ V<sub>(rms)</sub> เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสัญญาณแตกต่างกันผลลัพธ์ค่าจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 26) สามารถนำไปใช้ที่ความผิดพลาดของสัญญาณแรงดันที่รูปแบบแตกต่างกันได้ แต่ต้องอยู่ในเงื่อนไขของทฤษฎีนี้

4.3 จากรูปที่ 21 และ รูปที่ 23 เป็นผลการทดสอบของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กเบอร์ M5 และ M4 จากข้อมูลของแผ่นป้ายชื่อเมื่อกำหนดให้แรงดันสัญญาณขาขึ้นที่พิกัดมีค่า  $V_{(rms)}$  เท่ากับ 4.5 V ซึ่งจากการทดสอบ สมมติว่าเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณทำให้เกิด  $V_{1(rms)}$  มีค่าต่างๆ (4.1V, 4.3V, 4.5V, 4.7V) เห็นได้ว่าค่าจากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 26) มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ แสดงว่าถึงแม้ว่าแรงดันที่หม้อแปลงได้รับมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันที่พิกัดที่แผ่นป้ายชื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 26) ก็สามารถใช้ในการคำนวณได้

4.4 จากรูปที่ 19 และรูปที่ 20 เป็นผลการทดสอบวัดค่าแรงดันประสิทธิภาพผลของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ ของแกนเหล็กเบอร์ M4 และเบอร์ M5 ด้วยเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ Fluke 41B เทียบกับการใช้ Storage Oscilloscope ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL 1520 เพื่อเก็บข้อมูลและบันทึกข้อมูลด้วยแฟ้มนามสกุล CSV จากนั้นนำข้อมูลคำนวณด้วยฟังก์ชัน FFT ของโปรแกรม Matlab ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่แกนเหล็กเบอร์ M5 และ M4 ที่ได้จากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ

4.5 จากรูปที่ 25 เป็นผลการทดสอบของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กเบอร์ M5 ซึ่งมีค่ามากกว่าเบอร์ M4 ทั้งค่าที่วัดได้และค่าที่คำนวณได้ (ยกเว้นที่ค่า  $V_{1(rms)} = 4.3$  V ค่าที่วัดได้มีค่าเท่ากัน สาเหตุอันเนื่องมาจากเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าแสดงผลเป็นตัวเลขทศนิยม 1 ตำแหน่งเท่านั้น) แสดงว่าแกนเหล็กที่มีความหนาแน่นมากกว่ากำลังสูญเสียสูงกว่าแกนเหล็กที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าแต่ราคาของแกนเหล็กที่มีความหนาแน่นมากกว่าราคาจะถูกกว่ายกตัวอย่างเช่น แกนเหล็กเบอร์ M4 ปกติราคาทั่วไปปัจจุบันประมาณ 90 บาท/กิโลกรัม และแกนเหล็กเบอร์ M5 ประมาณ 80 บาท/กิโลกรัม เมื่อทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 1 เฟส สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** แสดงรายละเอียดต่างๆ เมื่อออกแบบโดยใช้แกนเหล็กเบอร์ M5

ขนาด (kVA)	20	30 (model A)	30 (model B)	50
แรงดันไฟฟ้า (kV)	22	22	22	22
พ.ท. หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	72.97	84.34	77.52	116.91
น้ำหนักแกนเหล็ก (kg)	77.69	95.78	82.54	141.07
ค่าความหนาแน่นของแกนเหล็ก (kg/dm <sup>3</sup> )	7.65	7.65	7.65	7.65
ราคาของแกนเหล็กทั้งหมด (บาท) เมื่อพิจารณาที่ 80 บาท/ก.ก.	6,215.2	7,662.4	6,603.2	11,285.6
กำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก เมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณขาขึ้น (Watt) โดยอ้างอิงจากผลการทดลองจากตารางที่ 1	54.2	66.825	57.583	98.423
พลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลง 15 ปี เมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณขาขึ้น (kWh)	7,121.88	8,780.805	7,566.406	12,933.965
จำนวนเงินที่จ่ายเนื่องจากพลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลง 15 ปี โดยพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้า 1.7034 บาท/หน่วย (ไม่รวมค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า) [4] เมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณขาขึ้น (บาท)	12,131.41	14,957.223	12,888.616	22,031.716
กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กเมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณขาขึ้น (kW) (โดยอ้างอิงจากผลการทดลองตารางที่ 3 รูปที่ 7 1.845W / 2.3936 kg = 0.77 Watt/kg คูณด้วยน้ำหนักแกนเหล็ก)	59.821	73.751	63.556	108.624
พลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลง 15 ปี เมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณขาขึ้น (kWh)	7,860.479	9,690.881	8,351.258	14,273.194

**ตารางที่ 4 (ต่อ)** แสดงรายละเอียดต่างๆ เมื่อออกแบบโดยใช้แกนเหล็กเบอร์ M5

จำนวนเงินที่จ่ายเนื่องจากพลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลง 15 ปี โดยพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้า 1.7034 บาท/หน่วย (ไม่รวมค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า) [4] เมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณชายนี (บาท)	13,389.54	16,507.45	14,225.53	24,312.959
จำนวนเงินที่แตกต่างของพลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กหม้อแปลงเมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณชายนีและไม่เป็นสัญญาณชายนี (บาท)	1,258.13	1,550.227	1,336.914	2,281.243

**ตารางที่ 5** แสดงรายละเอียดต่างๆ เมื่อออกแบบโดยใช้แกนเหล็กเบอร์ M4

ขนาด (kVA)	20	30 (model A)	30 (model B)	50
แรงดันไฟฟ้า (kV)	22	22	22	22
พ.ท. หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	72.97	84.34	77.52	116.91
น้ำหนักแกนเหล็ก (kg)	77.69	95.78	82.54	141.07
ค่าความหนาแน่นของแกนเหล็ก (kg/dm <sup>3</sup> )	7.65	7.65	7.65	7.65
ราคาของแกนเหล็กทั้งหมด (บาท) เมื่อพิจารณาที่ 90 บาท/ก.ก.	6,992.1	8,620.2	7,428.6	12,696.3
กำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก เมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณชายนี (Watt) โดยอ้างอิงจากผลการทดลองจากตารางที่ 2	50.42	62.16	53.568	91.554
พลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลง 15 ปี เมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณชายนี (kWh)	6,625.188	8,167.824	7,038.835	12,030.196
จำนวนเงินที่จ่ายเนื่องจากพลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลง 15 ปี โดยพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้า 1.7034 บาท/หน่วย (ไม่รวมค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า) [4] เมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณชายนี (บาท)	11,285.345	13,913.07	11,989.95	20,492.236
กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กเมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณชายนี (kW) (โดยอ้างอิงจากผลการทดลองตารางที่ 3 รูปที่ 7 1.761W / 2.3422 kg = 0.752 Watt/kg คูณด้วยน้ำหนักแกนเหล็ก)	58.423	72.027	62.070	106.0846
พลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลง 15 ปี เมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณชายนี (kWh)	7,676.782	9,464.348	8,155.998	13,939.516
จำนวนเงินที่จ่ายเนื่องจากพลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลง 15 ปี โดยพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้า 1.7034 บาท/หน่วย (ไม่รวมค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า) [4] เมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณชายนี (บาท)	13,076.63	16,121.57	13,892.927	23,744.572
จำนวนเงินที่แตกต่างของพลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กหม้อแปลงเมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณชายนีและไม่เป็นสัญญาณชายนี (บาท)	1,791.285	2,208.5	1,902.977	3,252.336

**ตารางที่ 6** แสดงรายละเอียดต่างๆ ของความแตกต่างเมื่อออกแบบโดยใช้แกนเหล็กเบอร์ M5 เทียบกับเบอร์ M4

ขนาด (kVA)	20	30 (model A)	30 (model B)	50
ราคาเหล็กเบอร์ M4 ที่มากกว่าเบอร์ M5 (บาทหรือ %)	776.9/12.5	957.8/12.5	825.4/12.5	1,410.7/12.5
พลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กของเหล็กเบอร์ M5 ที่มากกว่า M4 เมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณชายนี (kW หรือ %)	496/6.97	612.98/6.98	527.571/6.97	903.769/6.98
ราคาพลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กของเหล็กเบอร์ M5 ที่มากกว่า M4 เมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณชายนี (บาทหรือ %)	846.065/6.97	1,044.153/6.98	898.666/6.97	1,539.356/6.99
พลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กของเหล็กเบอร์ M5 ที่มากกว่า M4 เมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณชายนี (kW หรือ %)	183.697/2.34	226.533/2.34	195.26/2.34	333.678/2.34
ราคาพลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กของเหล็กเบอร์ M5 ที่มากกว่า M4 เมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณชายนี (บาทหรือ %)	312.90/2.34	385.88/2.34	332.61/2.34	568.39/2.34

จากตัวอย่างนี้ ถ้าเลือกออกแบบใช้แกนเหล็กเบอร์ M5 ถ้าเกิดหม้อแปลงเผชิญกับสภาพที่แรงดันไฟฟ้าเกิดมีความผิดเพี้ยนตามตัวอย่าง จากผลการคำนวณเห็นได้ว่าการใช้เหล็กเบอร์ M5 เสียค่าใช้จ่ายรวม (ค่าแกนเหล็ก+ค่าพลังงานสูญเสียตลอด 15 ปี) น้อยกว่าเหล็กเบอร์ M4 ร้อยละ 2.37 แต่ในการคำนวณนี้คิดราคาค่าไฟฟ้าปัจจุบัน [4] เท่ากับ 1.7034 บาท/หน่วย (ยังไม่ได้พิจารณาถึงค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า) แต่ถ้าพิจารณาถึงราคาพลังงานไฟฟ้าในอนาคต แล้วแนวโน้มอาจจะสูงขึ้น ก็จะทำให้โอกาสจากการเลือกใช้แกนเหล็กขนาดเบอร์ M4 เป็นทางเลือกที่ดีกว่า แต่ยังมีอีกทางเลือกหนึ่งคือติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic filter) ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์ ส่งผลทำให้ลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กได้มาก และยังช่วยลดค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่ขดลวดของหม้อแปลงได้อีกด้วย

## 5. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ที่เห็นได้ชัดว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็กที่คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับการวัด ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงที่ต้องเผชิญกับแรงดันที่มีค่าความผิดเพี้ยนสามารถทำได้ง่ายโดยการเก็บข้อมูลเฉพาะของแกนเหล็กจากชุดทดสอบ Epstein โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไซน์เพื่อแยกค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและค่าสูญเสียฮิสเตอร์รีซิสที่แรงดันพิกัด จากนั้นสร้างรูปแบบของสัญญาณแรงดันที่มีความผิดเพี้ยนต่างๆ และใช้ฟังก์ชัน FFT เพื่อแยกหาขนาดและมุมของแรงดันฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการคำนวณและการทดสอบเห็นได้ว่าแกนเหล็กเบอร์ M5 มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กมากกว่าเบอร์ M4 ประมาณร้อยละ 7.0 (แหล่งจ่ายเป็นสัญญาณไซน์) และร้อยละ 2.34 (แหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณไซน์) แต่ราคาแกนเหล็กเบอร์ M4 มากกว่าเบอร์ M5 ร้อยละ 12.5 ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมทั้งทางด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ควบคู่กันไป

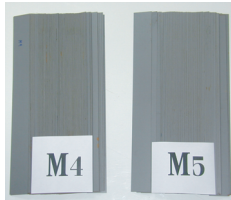
ข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ จากงานวิจัยนี้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ชุด Epstein มีค่าต่ำ สาเหตุเนื่องจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่ออกแบบสร้างขึ้นโดยใช้ IGBT เป็นตัวสวิตช์ จากการทดสอบเมื่อทำการปรับค่าแรงดัน D.C.Link ของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงๆ ทำให้เกิดแรงดันคลื่นยอดแหลม (Spike Voltage) ที่แหล่งจ่ายสูงและ dv/dt และ di/dt ของ IGBT มีค่าต่ำส่งผลทำให้ IGBT เสีย และงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงค่าสูญเสียของหม้อแปลงอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ขดลวด ซึ่งมีสาเหตุมาจากกระแสฮาร์โมนิกส์ของหม้อแปลง ซึ่งแท้ที่จริงแล้วต้องพิจารณาค่ากำลังสูญเสียนี้ประกอบรวม จึงทำให้การพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงมีความสมบูรณ์

ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ เช่น จากการออกแบบค่า B ของแกนเหล็กเบอร์ M4 (1.5Tesla) และ M5 (1.482Tesla) จากชุดทดสอบ Epstein มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย, ข้อผิดพลาดที่เกิดจากผู้ทำการทดสอบ, รวมถึงค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดทั้งสองและอื่นๆ

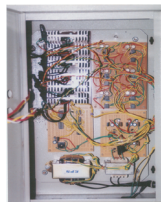
แนวทางในการพัฒนาของงานวิจัยต่อไปคือสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟสและพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย



## 6. ภาคผนวก



รูปที่ 26 แกนเหล็ก M4 และ M5



รูปที่ 28 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส



รูปที่ 30 ออสซิลโลสโคป Yokogawa



รูปที่ 27 ชุดทดสอบ Epstein



รูปที่ 29 L- C ฟิลเตอร์



รูปที่ 31 เพาเวอร์มิเตอร์ Fluke 41B

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพงศธร กุลวานิช, คุณวริษฐ์ ธรรมศิริโรจน์ และอาจารย์ เฉลิมชาติ มานพ ที่ช่วยเหลือด้านการเก็บข้อมูล และ บริษัท พงษ์พิมาณการไฟฟ้า จำกัด ที่ให้อำนวยความสะดวกเรื่องข้อมูลในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

## 8. เอกสารอ้างอิง

1. Alexander Eigeles, Xiaoming Wang, 1985, "Estimation of Life of Power Transformer Supplying Nonlinear Loads," IEEE Trans. On Power Apparatus and System, Vol. PAS-104, No.3, March, pp. 628-636.
2. P.C. Sen, 1997, "Principles of Electric Machines and Power Electronics," Wiley, pp. 20-21.
3. G. Fink, H. Beaty, 1993, "Standard Handbook for Electrical Engineering," McGraw-Hill, pp. 4-110, Table 4-50.
4. เอกสาร "อัตราค่าไฟฟ้า", 2545, การไฟฟ้านครหลวง, ตุลาคม, หน้า 1-11.